

# 海底油气管道碰撞问题参数敏感性分析

白俊磊 李琪 李欢 任桃桃 朱星盛 (上海航天控制技术研究所, 上海 201109)

**摘要:** 海底管道在海洋油气生产活动中扮演着重要角色, 本文对海洋油气管道在运行期间可能遭受的坠落物碰撞损伤进行研究。通过 ANSYS/LS-DYNA 显示动力有限元分析软件, 对海底管道坠落物碰撞损伤进行数值仿真, 获取坠落物形状、速度、质量等对坠物碰撞损伤的影响特性, 以及管道几何参数、海底管道覆层、管道埋深等保护措施对坠物碰撞损伤的保护效果。通过正交试验方法对各影响因素进行敏感性分析, 获得各影响因素敏感性大小, 为以后提出海底管道碰撞损失程度的综合定量评估方法奠定基础。

**关键词:** 海底管道; 碰撞分析; 数值模拟; 敏感性分析; 正交试验法

## 1 引言

海底管道在海洋油气生产活动中扮演着重要角色, 它将海上油气田的开采系统、生产集输系统以及输送系统连成一体。由于海洋石油管道运行环境的特殊性, 一旦发生泄露事故, 不但会对生产活动与生活造成影响, 还会造成海洋环境的污染, 因此其安全性备受关注。

造成海洋油气管道失效的因素主要分为三类: 机械损伤、腐蚀破坏、疲劳破坏<sup>[1]</sup>。本文将对海洋油气管道在运行期间可能遭受的坠落物碰撞损伤进行研究。海底管道坠物碰撞损伤的影响因素有很多, 主要包括撞击能量(坠落物质量与速度)、坠物形状、海底管道径厚比、管道混凝土保护层厚度、管道埋深等。本文将通过 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件, 使用正交试验的方法确定各影响因素的敏感性大小, 确定各影响因素中的主导因素, 为海底管道的安全防护提供参考。

## 2 海底管道坠落物碰撞数值模型

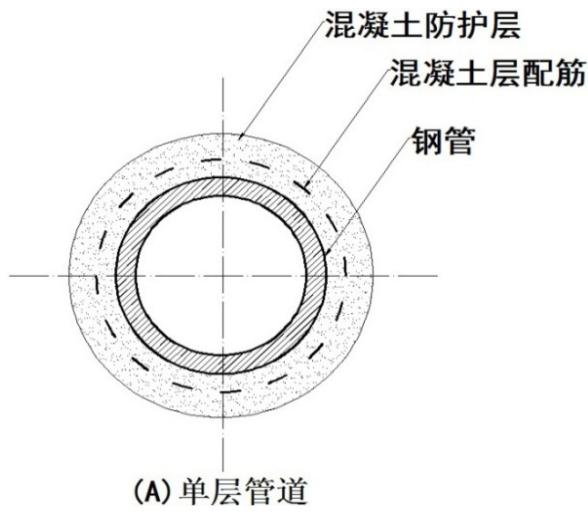


图 1 海底管道结构示意图

海底管道根据结构上的不同可以划分为单层管道、双重保温管道和三重保温管道。本文采用图 1 所示的单层管道进行分析。

### 2.1 管道的本构关系

海底管线采用的钢管材质参照美国石油学会 (API) 的 API Spec 5L 规范<sup>[2]</sup>。本文根据 API Spec 5L 中相应的要求, 选取 X65 型钢级的钢管进行分析, X65 型钢的材料特性如表 1 所示:

表 1 管道的材料特性参数

材料等级	杨氏模量	泊松比	规定的最小屈服强度
	E (N/m <sup>2</sup> )	v	SMYS (Pa)
X65	$2.1 \times 10^{11}$	0.3	$4.48 \times 10^8$

海底管道选取随动强化弹塑性模型, 在 LS-DYNA 程序中使用 \*MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC (\*MAT\_003) 来模拟。通过 Cowper-Symonds 模型考虑材料的应变率影响。材料的屈服应力如式 (1) 所示:

$$\sigma_y = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_{eff}^p) \quad (1)$$

其中:

$\sigma_y$  为材料的屈服应力;

$p$ 、 $C$  为该模型的应变率参数;

$\sigma_0$  为材料的初始屈服应力;

$\beta$  为介于 0~1 的常数, 是调整等向强化、随动强化的参数;

$\varepsilon_{eff}^p$  为有效塑性应变;

$E_p$  为塑性硬化模量。

$$E_p = \frac{E_t \cdot E}{E - E_t} \quad (2)$$

其中：

$E$  为弹性模量；

$E_t$  为切线模量。

本文海底管道数值计算采用的参数如表 2 所示，密度选取  $7850\text{kg/m}^3$ 。

表 2 管道的 C-S 模型材料参数

弹性模量	泊松比	屈服极限	切线模量	应变参数	应变参数	失效应变	强化参数
$E$ ( $\text{N/m}^3$ )	$\nu$	$\sigma_0$ (Pa)	$E_t$ ( $\text{N/m}^3$ )	$C(s^{-1})$	$p$	$f_s$	$\beta$
$2.1 \times 10^{11}$	0.3	$4.48 \times 10^8$	$1.7 \times 10^9$	40	5	0.12	0

## 2.2 海床的本构关系

海底管道铺设在海床之上，海底管道所处的土壤介质对于管道响应的影响是显而易见的，因此在分析中需要考虑海床对海管碰撞问题的影响。海床是一种典型的非线性材料，而且在碰撞过程中其载荷是动态变化的，需要选用合适的本构模型对其进行描述。本文将采用 Drucker-Prager (DP) 模型模拟海床，它能够比较好的模拟土体在冲击载荷作用下的弹塑性变形，并且在大变形计算中不会出现数值不稳定的现象。LS-DYNA 材料库中的 \*MAT\_DRUCKER\_PRAGER (\*MAT\_193) 可以模拟 D-P 模型。需要输入的参数包括：材料密度、泊松比、剪切模量、内摩擦角、内聚力、膨胀角等。ANSYS/LS-DYNA 前处理中自带的材料库没有 D-P 模型，需要在输出的 K 文件中进行添加修改，其具体参数如表 3 所示：

表 3 海床的 D-P 模型材料参数

土壤密度	剪切模量	泊松比	内摩擦角	内聚力	膨胀角
$\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$G$ ( $\text{N/m}^2$ )	$\nu$	$\psi$ (°)	$c$ (Pa)	$\psi$ (°)
$1.96 \times 10^3$	$6 \times 10^6$	0.2	30	$1.8 \times 10^4$	0

## 2.3 混凝土配重层的本构关系

海底管道外覆层主要包括管道外涂层及海底管道配重层。其中管道外涂层主要用于管道防腐，海底管道配重层为钢筋混凝土结构，具有足够的密度、厚度以及足够的力学强度，以保证管道使用寿命期间所要求的负浮力，并在管道吊装、运输、铺设和寿命期间抵御外来物体的冲击破坏。海底管道配重层由混凝土及内置加强筋构成。本文采用整体式方式模拟钢筋混凝土结构。混凝土是由水泥、水和骨料组成的复杂

多相复合材料，其力学性能复杂。本文选取 \*MAT\_GEOLOGIC\_CAP\_MODEL 动力硬帽盖模型模拟混凝土，该模型属于塑性模型，常用于低速撞击问题，能够很好的反映混凝土材料在受到撞击达到屈服强度后的硬化效应。

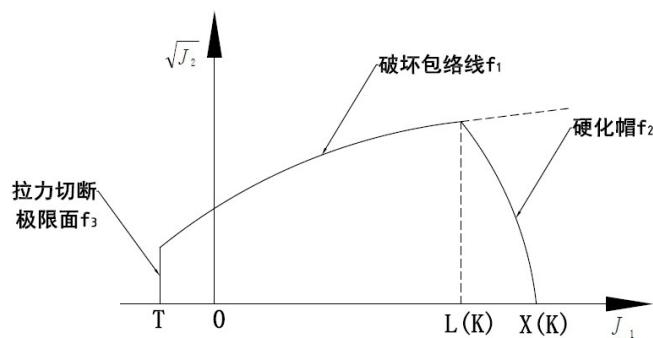


图 2 混凝土材料动力帽盖模型

在本文的计算中，使用如表 4 所示的参数定义动力帽盖模型来模拟混凝土，混凝土密度取值为  $2700\text{kg/m}^3$ 。

表 4 混凝土的帽盖模型材料参数

剪切模量	体积模量	$f_1$ 参数	$f_1$ 线性参数	$f_1$ 指数参数
$G$ ( $\text{N/m}^2$ )	$K$ ( $\text{N/m}^2$ )	$\alpha$	$\theta$	$y$
$1.1 \times 10^{10}$	$1.4 \times 10^{10}$	$2.7 \times 10^7$	0.11	$8.0 \times 10^6$
硬化指数	硬化系数	硬化指数	$f_1$ 指数	硬化帽 $f_2$ 长短轴比
$D$	$W$	$X_0$	$\beta$	$R$
$4.6 \times 10^{-10}$	0.42	$1.1 \times 10^8$	$1.4 \times 10^{-7}$	4.43

## 2.4 建立数值计算模型

数值模拟部分包含海底管道、海床、坠落物以及混凝土配重层。该碰撞问题涉及到结构材料的非线性、几何非线性、接触非线性等，使用体单元模拟最为合理，本文采用 SOLID164 实体单元进行分析。SOLID164 单元适用于 ANSYS/LS-DYNA 显示动力学分析，支持材料、几何、接触的非线性特征，可以模拟钢材、土壤、混凝土等，与本文所要仿真的问题相吻合。

坠落物使用刚性体以降低计算成本，且结果是偏于保守的。坠落物的主要参数为： $7850\text{kg/m}^3$ ， $E=210\text{GPa}$ ， $\nu=0.3$ 。在分析中考虑坠落物附加水质量，在计算中使用等效密度的方法考虑附加水质量的影响，将附加

水动力质量以密度的形式加到坠落物上。使用球形坠落物体,选取附加水质量系数  $C_a=1$ ,求得等效密度为  $8825\text{kg/m}^3$ 。

在有限元模型建立以后,需要定义模型的边界条件、初始条件以及各 PART 间的接触类型。

海床的边界条件:上表面为自由边界不定义约束,下表面固定垂向位移( $RY=0$ ),侧面分别固定侧向位移,即与  $YOZ$  平面平行的面约束  $X$  方向位移( $RX=0$ )、与  $XOY$  平行的面约束  $Z$  方向位移( $RZ=0$ )。对海底管道两端固定轴向位移( $RZ=0$ )。

定义接触类型:ANSYS/LS-DYNA 里对接触的定义是建立在 PART 的基础上,本文的分析中各 PART 之间使用自动面面接触(ASTS)。考虑接触面间的摩擦,管土之间的摩擦系数取 0.18,管道与坠落物的摩擦系数取 0.3。

### 3 影响因素敏感性分析

表 5 正交试验用因素水平表

试验因素						
水平	径厚比(壁厚) A (mm)	覆层厚度 B (m)	管道埋深 C (m)	坠物质量 D (kg)	坠物速度 E (m/s)	
1	63.29 (7.9)	0.01	0.1	2000	7	
2	52.63 (9.5)	0.03	0.2	2500	8	
3	45.05 (11.1)	0.05	0.3	3000	9	
4	39.37 (12.7)	0.07	0.4	3500	10	

影响海底管道在坠落物冲击载荷作用下损伤情况的因素有很多,主要包括撞击能量(坠物质量与速度)、坠物形状、海底管道径厚比、管道混凝土保护层厚度、管道埋深等。在这些因素中,不能直观的辨别出哪种因素在各因素中占据主导地位,如果进行全面计算则计算量很大,采用正交试验方法可以有效缩减计算量。正交试验是利用正交试验表针对研究对象多因素、多水平的情况进行试验搭配,进而挑选出对实验结果影响较大的因素,它的优点是只需要很少的试验次数就可以反映研究对象各影响因素完全组合的内在规律,可以避免各种试验因素搭配产生的巨大工作量,是一种高效、经济、科学的试验设计方法。通过对计算结果进行极差分析,可以得到各参数敏感性大小,由此完成对海底管道损伤影响参数的敏感性分析。

敏感性试验设计:

本文选取海底管道受到坠物碰撞后产生的凹陷值作为试验指标。试验因素分别包括以下几种:海底管道钢管的径厚比、管道覆层的厚度、管道埋深、坠落物质量、坠落物速度。其中每个因素选四个水平,需要选用 5 因素 4 水平正交表  $L_{16}(5^4)$  如 2.1 所示。选取海底管道直径为 0.5m,长为 10m;海床长为 10m,宽为 10m,高为 5m,其余参数如表 5 所示。

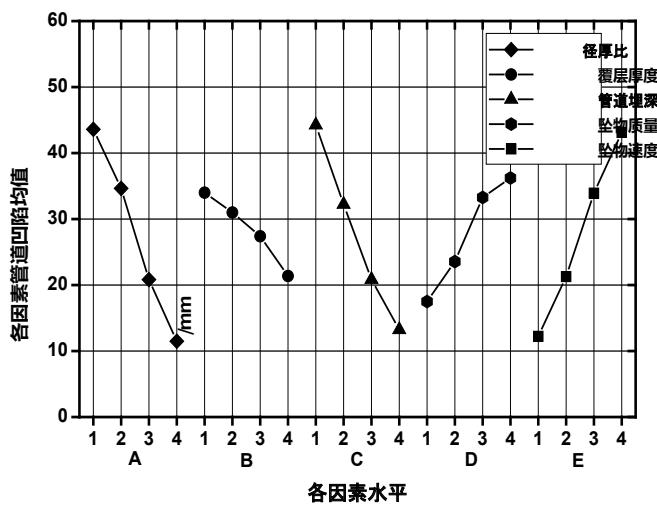


图 3 管道凹陷值均值随因素水平变化曲线

### 4 结论

本文以海底管道坠落物损伤为研究主题,使用显式动力非线性有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA 进行了数值模拟,揭示了海底管线在坠物冲击载荷作用下的损伤机理,结论如下:

①管道发生碰撞损伤后的凹陷值随撞击能量(坠落物质量与速度)的增加而增加,随管道壁厚、管道混凝土保护层厚度、管道埋深的增加而减小;

②在所选的 5 个因素 4 个水平下,参数敏感性大小顺序为:管道壁厚(径厚比)、管道埋深、坠落物速度、坠落物质量、管道混凝土配重层厚度。所得的结果对于海底管道安全防护具有一定的参考意义。

### 参考文献:

- [1] 徐中华,王卫东.敏感环境下基坑数值分析中土体本构模型的选择[J].岩土力学,2010,31(1):258-264.
- [2] 刘建成,顾永宁.基于整船整桥模型的船桥碰撞数值仿真[J].工程力学,2003,20(5):155-162.

### 作者简介:

白俊磊(1987-),男,汉族,河南漯河人,硕士研究生,工程师,研究方向:结构设计。